

# Makale

## SU GEÇİRİMLİLİĞİNİN DONATI KOROZYONUNA ETKİSİ\*

Araş. Gör. Dr. Nabi YÜZER Yıldız Teknik Üniversitesi

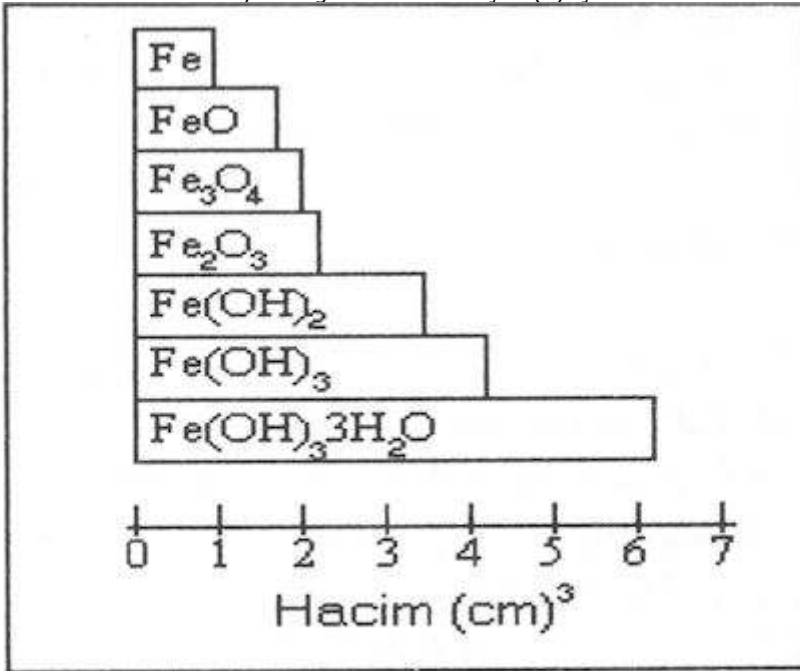
### ÖZET

Betonun su geçirirliiliği nedeni ile çatlaması ve parça atması, donatı korozyonuna neden olan agresif çözeltilerin donatıya daha kolay ulaşmasına neden olur. Korozyona uğrayan donatı yüzeyindeki pas ürününde meydana gelen hacim artışı, çekme dayanımı düşük gevrek bir malzeme olan betonun çatlamasının ve parça atmasının önemli nedenlerinden biridir. Bu çalışmada, geçirirliilik özelliği farklı numuneler üretilerek, geçirirliili betonların donatı korozyonunu nasıl etkilediği deneysel olarak araştırılmıştır. Daha az geçirirliili betonlar üretmek amacı ile silis dumanından yararlanılmıştır. Betonda su geçirirliiliği, farklı konsantrasyonlardaki çözeltilerin etkisinde kalan numunelerde kılcal su emme deneyi ile; geçirirliiliğin donatı korozyonuna etkisi tarafımızdan geliştirilen hızlandırılmış korozyon deneyi ile araştırılmıştır. Silis dumanı gibi aktif SiO<sub>2</sub> oranı çok yüksek puzolan malzeme kullanımı ile elde edilen daha az boşluklu, yüksek dayanımlı ve daha az geçirirliili betonun, donatı korozyonunun önlenmesinde son derece etkili olduğu görülmüştür.

### I.GİRİŞ

Atmosfer etkisinde kalan demir yüzeyinde oluşan demiroksit veya demirhidroksit tabakasının bünyeden ayrılması, kütlede ağırlık kaybına neden olur. İhmal edilebilecek düzeyde olan bu kayıplar %600'e varan hacim artışına neden olur (Şekil 1). Bu hacim artışı betonarme elemanlarda, donatıda meydana gelirse, çekme dayanımı çok düşük ve gevrek bir malzeme olan betonun çatlamasına ve parça atmasına neden olur. Bu sonuç, 1. Boğaziçi Köprüsü ile Altunizade Köprüleri arasındaki aydınlatma direklerinde, donatı korozyonu nedeni ile oluşan çatlama ve parça atma hasarlarında olduğu gibi pek çok yerde karşımıza çıkmaktadır (Şekil 2). Bu hasarların sonucu, her zaman bu kadar hafif şekilde kendini göstermez, yapının göçmesi şeklinde de ortaya çıkabilir.

Şekil 1. D emir oksitlerinde meydana gelen hacim artışları(1) için: [bakınız: 12](#)



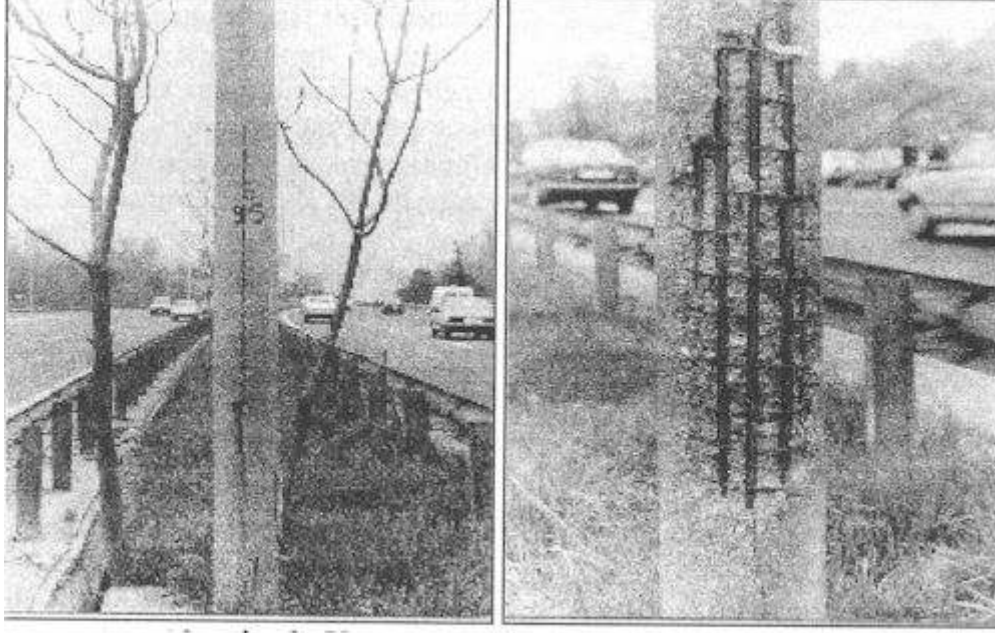
Şekil 1. Demiroksitlerinde meydana gelen hacim artışları<sup>[1]</sup>

Korozyon, metallerin bulunduğu ortam içinde, kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu bozulması şeklinde tanımlanmaktadır. Korozyon nedeni ile metal veya alaşımın fiziksel, kimyasal veya elektriksel özelliğinin istenmeyen değişikliklere uğraması önemli maddi kayıplara yol açar. Örneğin Türkiye'deki korozyon kayıplarının GSMH'nin %4.36'sına eşit olduğu araştırmalar sonucu elde edilmiştir<sup>^</sup>. 1997 yılında eğitime ayrılan payın, GSMH'nin %1.76'sı, 1998 yılında %2.53'ü olduğu dikkate alınırsa, konunun önemi açıkça görülmektedir.

Donatı korozyonu ile ilgili araştırmalarda, donatı korozyonu nedeni ile yapı hasarlarının onarımı için her yıl milyonlarca doların harcandığı be-lirtilmektedir31 Ülkemizde beton içindeki çeliğin korozyonuna, henüz yeteri

kadar önem verilmediğinden onarım harcamaları içinde korozyon harcamasının payını tahmin etmek zordur. Son yıllarda, ekonomik ve sosyal problemler nedeni ile önem kazanan donatı korozyonu ile ilgili araştırmaların sayısı artmakta ve donatı korozyonuna karşı alınacak önlemler için önemli kaynaklar ayrılmaktadır.

Şekil 2. Boğaziçi ve Altunizade Köprüleri arasındaki aydınlatma direklerinden görünüş için **bakınız: 13**

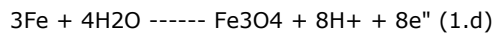
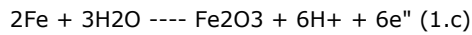
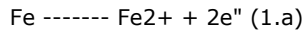


Şekil 2. Boğaziçi ve Altunizade Köprüleri arasındaki aydınlatma direklerinden görünüş

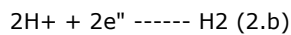
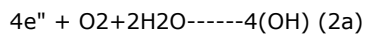
Beton içindeki çeliğin korozyonu elektro-kimyasal süreç ile açıklanabilir. Çelik yüzeyinde oluşan farklı elektro-kimyasal potansiyelle sahip anodik ve katodik bölgeler, çimento hidratlarındaki tuz çözeltilerinin oluşturduğu elektrolit ile birleşir, donatının kendisi de elektronları ileten elektriksel iletkeni teşkil ederdi. Beton, alkalinitesi yüksek bir ortamdır ve içindeki çelik yüzeyinde kararlı, koruyucu bir oksit tabakası oluşturarak anodik akım yoğunluğunun kısıtlanmasına yardımcı olur. Bu olaya alkali pasivasyon adı verilir. Ancak beton, klorür iyonlarının donatıya kadar nüfuz etmesine neden olacak kadar geçirimli ise, ortamda su ve oksijen varsa ve karbonatlaşma nedeni ile ortamın pH'ı II'in altına düşerse donatı yüzeyindeki pasiv demiroksit tabakası tahrip olur, korozyon süreklilik kazanır(5).

Dış kaynaklı akımın olmadığı durumda elektrokimyasal reaksiyon için, elektronların açığa çıktığı anodik reaksiyon ve korozyonun sürekliliği için açığa çıkan elektronların tüketildiği katodik reaksiyonun olması gerekir. Beton içinde bulunan donatı için önemli anodik reaksiyonlar aşağıda (1.a-d) bağıntısı ile, katodik reaksiyonlar ise (2.a-b) bağıntısı ile gösterilmiştir; (2.a-b) ile gösterilen olası katodik reaksiyonlar, donatı yüzeyinin etrafındaki pH'a ve O<sub>2</sub>'nin varlığına bağlıdır(6).

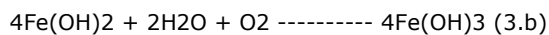
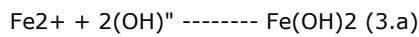
Anot reaksiyonları,



Katot reaksiyonları,

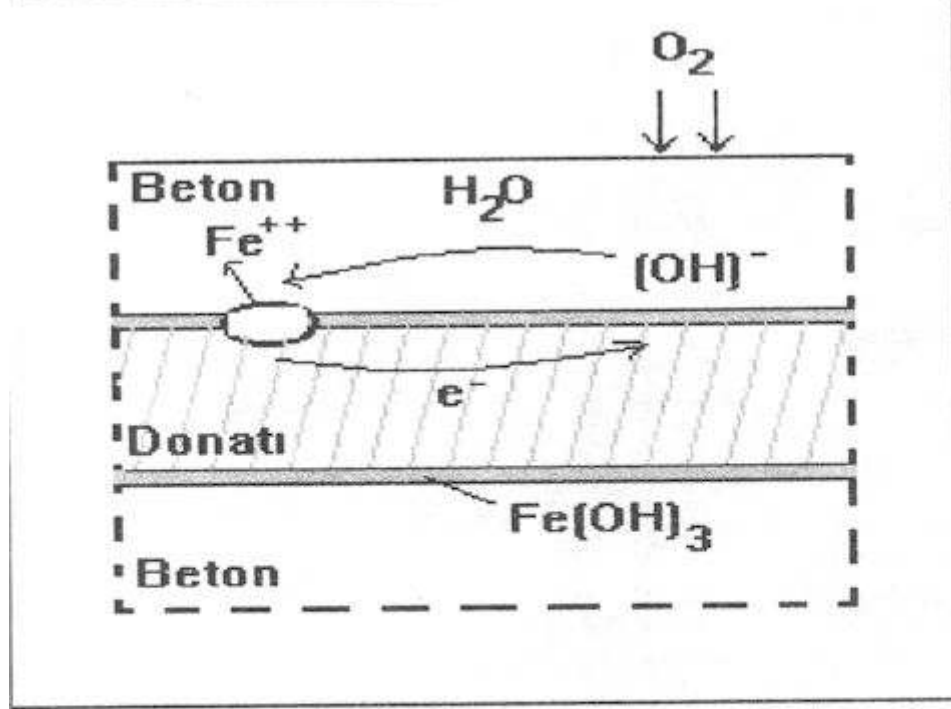


Katotta açığa çıkan hidroksil, anotta açığa çıkan demir iyonları ile birleşerek (3.a) reaksiyonu ile gösterilen ferrohidroksite, sonra daha kararlı haldeki ferrihidroksite (3.b) dönüşür(5).



Passivasyonu sağlayan ve donatıyı kaplayan pas tabakası da Şekil 3'te görüldüğü gibi  $Fe(OH)_3$  tür (5).

Şekil 3. Beton içindeki donatının korozyonu ve passivasyon tabakası(5) için: [bakınız: 14](#)



Şekil 3. Beton içindeki donatının korozyonu ve passivasyon tabakası<sup>[5]</sup>

Nürnberg'ın(7) belirttiği gibi hava ile irtibat halinde olan bir betonarme yapıda, beton içindeki su ve  $O_2$  miktarı, korozyonun oluşmasına neden

olabilecek seviyededir. Yeterli yoğunlukta ve yeterli pas payına sahip betonarme elemanında betondaki su miktarı fazla olsa bile  $O_2$  difüzyonu azaldığı için korozyon tehlikeli sınırlara ulaşmayacaktır. Ancak  $Ca(OH)_2$ 'nin betonda karbonatlaşması veya ortamda belirli sınırı aşmış serbest

CPnin varlığı donatı korozyonuna yol açacaktır. Bu nedenle betonarmede donatının korozyonunu beton özellikleri belirleyecektir.

Betonun dayanımını ve geçirimliliğini dolayısı ile donatı korozyonunu etkileyen en önemli faktör beton içindeki toplam boşluk oranıdır. Beton içindeki boşluklar, agrega tanelerinin bünyesi içindeki boşluklar, agrega taneleri arasında kalan boşluklar, betonun farklı oturmasının yol açtığı boşluklar, agrega çimento ara yüzünde oluşan boşluklar ve sertleşmiş çimento hamuru içindeki boşluklar olarak sayılabilir. Bunlardan agrega taneleri içindeki boşluklar, agreganın mensubu olduğu doğal taşın özelliklerine bağlıdır ve beton geçirimliliğindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Betonun iyi yerleştirilememesi nedeni ile çimento hamurunun agrega taneleri arasına giremediği durumda, agrega taneleri arasında meydana gelen boşluklar ise taze beton özelliklerine ve işçiliğe bağlı denetlenen boşluklardır. Taze betonda agrega-çimento ara yüzünde ve agrega taneleri arasında  $10^{-4}$  cm'den büyük boyutta küresel makro boşluklar veya kılcal boşluklar vardır. Bundan başka taze betonun oturmasının herhangi bir nedenle engellenmesi ve özellikle iri agrega tanelerinin donatıya veya kalıba sürtünmesi nedeni ile askıda kalması sonucu, iri agrega tanelerinin altında meydana gelen boşluklar, betondaki çeper etkisi dikkate alınarak azaltılabilir. Sertleşmiş çimento hamuru içinde, çimento hidratasyonu sonucu çok küçük boyutta boşluklar oluşur. Bunlar, çimento pastası hacminin yaklaşık %12'si oranında ve  $0.5 \times 10^{-8}$  ile  $3 \times 10^{-7}$  cm boyutunda jel boşlukları,  $3 \times 10^{-7}$  ile  $5 \times 10^{-3}$  cm boyutunda ve su/çimento oranının bir fonksiyonu olan kılcal boşluklar ve hacmin %7'sini oluşturan  $10^{-2}$  ile  $10^{-1}$  cm boyutlu makro boşluklardır. Hidratasyonun ilerlemesi ile bu boşlukların oranında bir azalma olur. Ayrıca ilk günlerde birbiriyle bağlantılı olan boşluklar ve kılcal borular zamanla jel hacminde meydana gelen artış nedeni ile tikanarak sürekliliğini kaybeder. Beton üretiminde, silis dumanı gibi özgül yüzeyi çok yüksek puzolanların kullanımı da boşluk miktarını önemli oranda azaltmaktadır. Betonun bünyesindeki suyun miktarını ve geçirimliliğini beton yüzeyindeki ortamın bağıl nemi de etkiler. Örneğin beton yüzeyinin yağmur suyu ile doğrudan teması halinde, sertleşmiş çimento pastası içindeki boşlukların suyu absorpsiyonu nedeni ile su miktarı artar. Ortamın bağıl nemi düşük ise su buharlaşarak betondan uzaklaşır. Betonun su emme davranışı yani betonun sıvı ve gazların difüzyonuna karşı direnci, daha

çok kapiler porozite ile belirlenir. Havanın bağıl nemi % 99.9'un altına düşerse kapiler boşluklardaki su buharlaşmaya başlar. Bağıl nem %65 civarında ise, makro boşluklardaki ve kapiler boşluklardaki serbest su buharlaşabilir. İnce jel boşluklardaki adsorbe su, yüzeye Vander Walls bağları ile bağlı olduğundan, bünyeyi terk etmesi zordur ve buharlaşma hızı düşüktür(7,8,9,10)

Beton içine gömülü çeliğin (donatının) korozyonunda alınacak ilk önlem, kaliteli bir beton üretmektir. Donatı korozyonu bakımından kaliteli bir betonun göstergesi dayanıklılıktır. Dayanıklı bir beton, minimum boşluklu, akışkan geçirimsizliğine sahip, kimyasal etkilerle çözülmeden, aşınmayan bir betondur. Bütün bu nitelikler arasında geçirimsizlik özelliği, betonların dış etkilere karşı dayanımında en önemli rolü oynayan ve en çok sözü edilen özelliktir. Betonda akışkan geçirimsizliği, basınçlı su geçirimsizliği, kılcal su geçirimsizliği ve buhar geçirimsizliği olmak üzere üç farklı süreçle meydana gelmektedir(4).

Bu çalışmada, geçirimsizlik özelliği farklı harç ve betonarme elemanlar üretilerek, geçirimsiz betonların donatı korozyonunu nasıl etkilediği deneysel olarak araştırılmıştır. Daha az geçirimsiz betonlar üretmek amacı ile silis dumanından yararlanılmıştır. Betonda su geçirimsizliği, farklı konsantrasyonlardaki çözeltilerin etkisinde kalan numunelerde kılcal su emme deneyi ile, geçirimsizliğin donatı korozyonuna etkisi tarafımızdan geliştirilen hızlandırılmış korozyon deneyi ile araştırılmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Betonarme elemanlarda su geçirimsizliğinin donatı korozyonuna etkisinin araştırılması amacı ile düzenlenen deneysel çalışma, numunelerin üretimi, küre, eskitme süreci ve kontrol deneyleri olmak üzere başlıca dört aşamada gerçekleştirilmiştir. Araştırma, son yıllarda beton üretiminde yaygın kullanım alanı bulan silis dumanının etkinliğini ve donatı korozyonu için en önemli sorunlardan biri olan klorür iyonunun difüzyonunu kapsamaktadır.

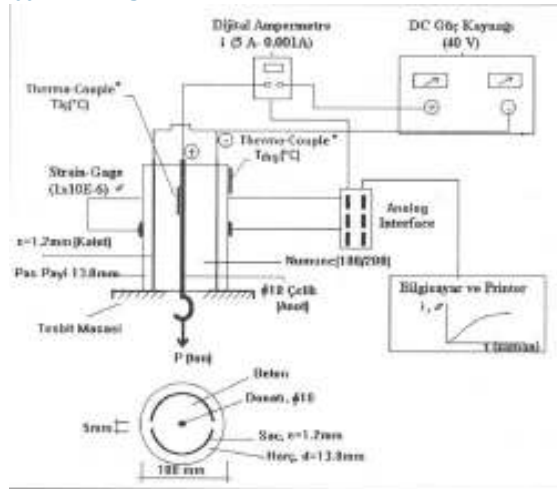
Kontrol deneyleri harçta ve betonarme numunelerde yapılmıştır. Kontrol deneyleri, harçta kılcal su emme deneyi; betonarme numunelerde hızlandırılmış korozyon deneyi ile gerçekleştirilmiştir.

Betonarmede donatı korozyonunu hızlandırma çalışmalarında, sisteme ya sabit gerilme uygulanarak akım şiddeti ölçülmüş ya da akım şiddeti sabit tutularak betonda çatlak oluşumu gözlenmiştir. Bu çalışmada ise daha önceki çalışmalardan farklı olarak Şekil 4'te görülen deney düzeneği geliştirilmiş, donatıya sabit aderans gerilmesi ve sabit gerilim uygulanarak akım şiddeti ve betondaki deformasyonlar ölçülmüş ve kaydedilmiştir[11].

Kontrol deneylerinden kılcal su emme deneyi için toplam 117 adet 40x40x70 mm harç numune, hızlandırılmış korozyon deneyi için kesiti Şekil 4'te verilen 36 adet betonarme numune üretilmiştir. Numuneler, çözeltilere konulacağı 28. güne kadar  $20 \pm 1$  ° C sıcaklıktaki suda küre edilmiş, 28. gün eskitme süreci için başlangıç kabul edilerek, bugünden itibaren 0, 28, 90 ve 180. günlerde kılcal su emme kontrol deneyi yapılmıştır. Hızlandırılmış korozyon deneyi 180. günde gerçekleştirilmiştir. Klorürün difüzyonunu araştırmak üzere üretilen numuneler, sıcaklığı  $20 \pm 3$  °C olan suda, 1500 mg/L, 10000 mg/L ve 40000 mg/L Cl-konsantrasyonundaki sodyum klorür çözeltileri içinde saklanmıştır. Suda ve çözeltilerde saklanan numuneler kontrol deneylerinin yapılacağı günden 24 saat önce çözeltilerden çıkarılarak laboratuvar ortamında bekletilmiştir.

Numuneler Çizelge 1'de görüldüğü gibi üretimde silis dumanı katkı oranına, eskitme koşullarına ve klorür konsantrasyonuna bağlı olarak kodlanmıştır. Buna göre, üretimde silis dumanı katılmayanlar SFO, %10 silis dumanı katkıları SF1, %20 silis dumanı katkıları SF2; suda ve çözeltilerde saklananlar W ile gösterilmiştir. Çözeltilerin Cl- konsantrasyonu için suda saklananlar W0, 1500 mg/L Cl- içerenler W1, 10000 mg/L Cl- içerenler W2 ve 40000 mg/L Cl- içeren çözeltiler için W3 olarak kodlanmıştır. Deney düzeneğinin şematik gösterimi için:

**bakınız: 15**



Üretilen numunelerin kodları Çizelge 1 için: **bakınız: 16**

Çizelge 1. Üretilen numunelerin kodları

C1- Miktarı (mg/L)	0 (0)			1500 (1)			10000 (2)			40000 (3)		
	0	10	20	0	10	20	0	10	20	0	10	20
Numune Kodları	SF0W0	SF1W0	SF2W0	SF0W1	SF1W1	SF2W1	SF0W2	SF1W2	SF2W2	SF0W3	SF1W3	SF2W3

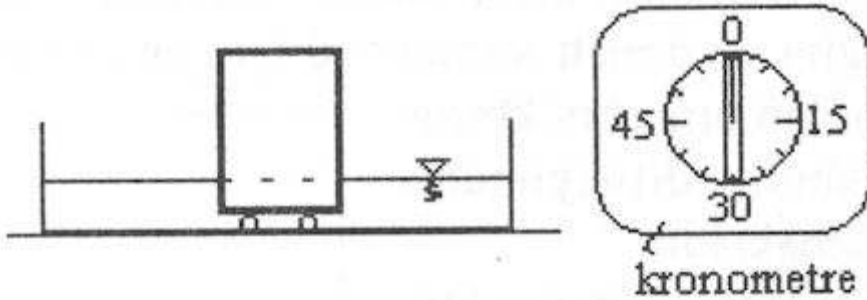
### Kılcal Su Emme Deneyi

Betonun klorür difüzyonunu etkileyen fiziksel özelliklerin başında, geçirimsizlik özelliği gelmektedir. Geçirimsizliğin belirlenmesi amacı ile belirli günlerde kılcal su emme deneyi yapılmış, betonun geçirimsizliğine silis dumanı oranının, klorür konsantrasyonunun ve zamanın etkisi incelenmiştir. Kılcal su emme deneyi 40x40x70 mm boyutlu 3 adet prizma numunenin 40x40 mm'lik yüzeyinde yapılmıştır. Numuneler öncelikle 100±5 °C sıcaklıktaki etüvde değişmez ağırlığa kadar kurutulmuştur. Deney düzeneği Şekil 5'te verilen kılcal su emme deneyi, 3 numune için aynı anda başlatılmak ve 1., 4., 9., 16., 25., 36., 49. ve 60. dakikada tartım yapılmak üzere sürdürülmüştür. Deney sonuçlarından ve lineer regresyon analizinden yararlanılarak ortalama kılcal su emme katsayıları (K) hesaplanmıştır. Elde edilen deney sonuçları Şekil 6-9'da gösterilerek değerlendirilmiştir.

### Hızlandırılmış Korozyon Deneyi

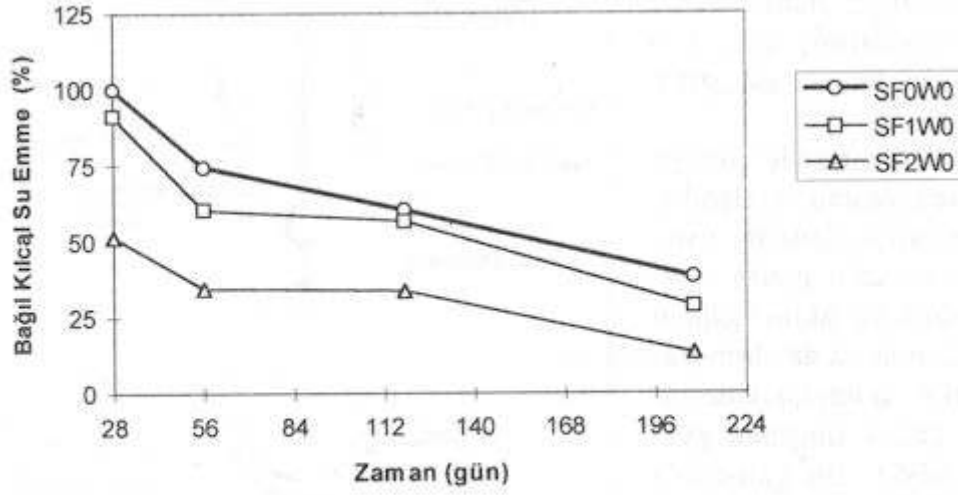
Korozyon hasarını etkileyen en önemli parametrelerden biri betonun elektriksel iletkenliğidir. Bu bölümde zamanla beton içinden geçen akım miktarı ölçülerek, farklı beton karışımlarının performanslarının dolayısıyla geçirimsizlik özelliklerinin karşılaştırılması sağlanmıştır. Hızlandırılmış korozyon deneylerinde akım şiddeti 1 mA, deformasyonlar ise  $2.25 \times 10^{-6}$  duyarlık ile ölçülmüştür. Sisteme gerilim ve gerilmenin uygulanmaya başladığı andan itibaren ilk birinci saatte Ter dakika, ikinci saatte 5'er dakika, üçüncü saatte 10'ar dakika, dördüncü saatte 15'er dakika, beşinci saatte 30'ar dakika ara ile kayıt yapılmıştır. Okumalar beşinci saatten itibaren 1'er saat ara ile yapılmış ve yedinci güne kadar bilgisayara kaydedilmiştir. Betonun çatlamasına izin verilen bölgelerin tam ortasına gelecek şekilde karşılıklı iki yüzeye yerleştirilen strain-gauge'ler ile ilk çatlağın yüzeye ulaştığı an belirlenebilmiştir. Başlangıçtan çatlağın tespit edildiği ana kadar geçen süre kritik süre (ter) olarak adlandırılmıştır. Deney düzeneğine aynı anda 3 numune yerleştirilmiş, ölçümlerin elektrik kesintilerinden etkilenmemesi için, sistem güç kaynağı ile jeneratöre bağlanmıştır. Beton yüzeyindeki beton içinden geçen akım şiddetinin zamanla değişimi Şekil 10-13'te ve kritik çatlama süreleri Çizelge 2 ve Şekil 14'te verilmiştir.

Şekil 5 için **bakınız: 17**



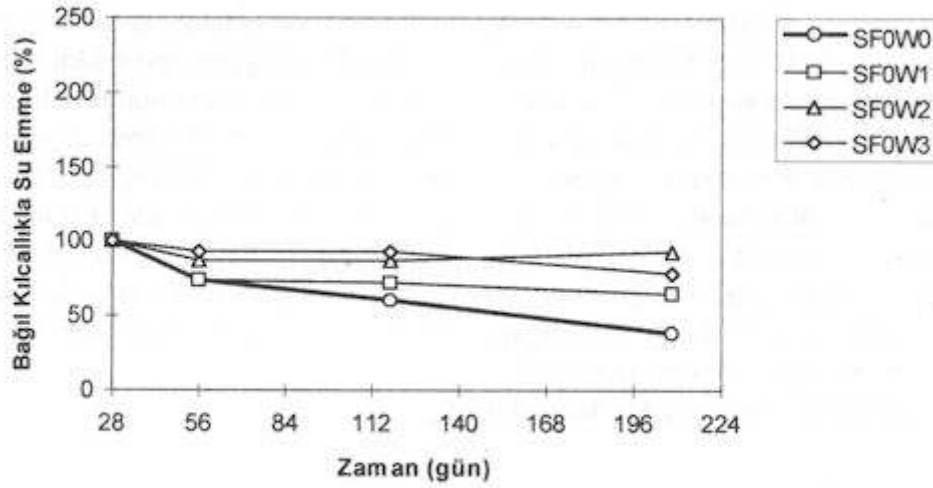
Şekil 5. Kılcal su emme deney düzeneği

Şekil 6 için **bakınız: 18**



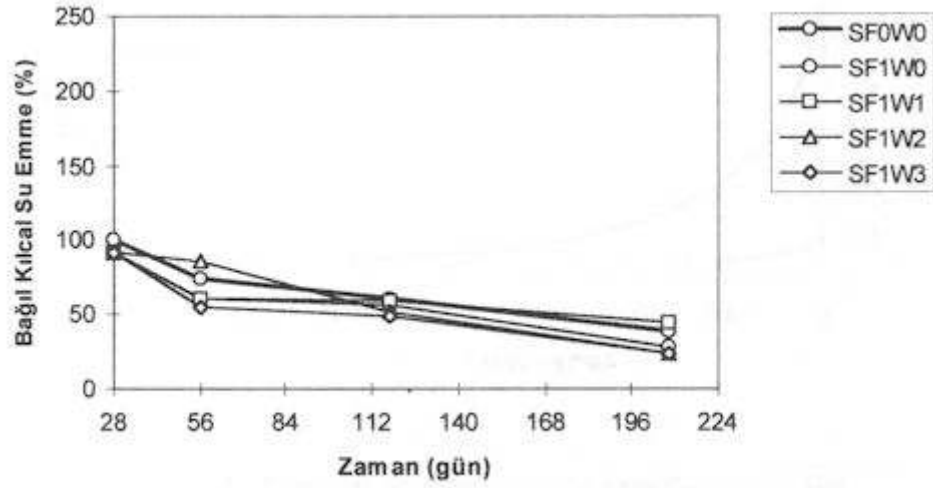
Şekil 6. Kılcal su emme katsayısı bağıl değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 7 için **bakınız: 19**



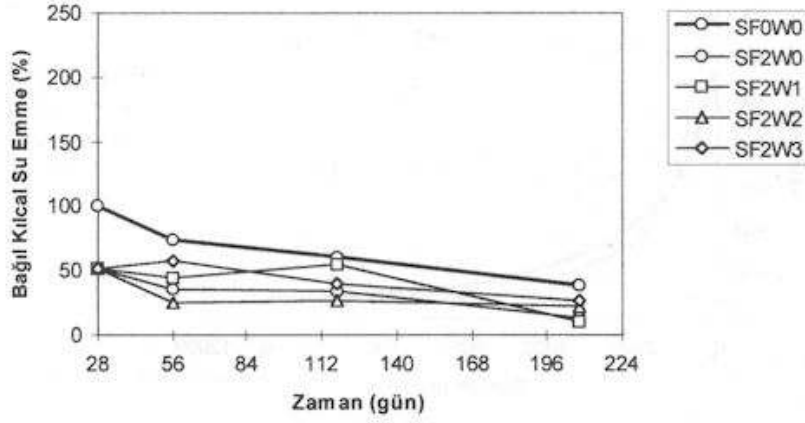
Şekil 7. Çözeltilerde bekletilen şahit grubun (%K-t) ilişkisi

Şekil 8 için **bakınız: 20**



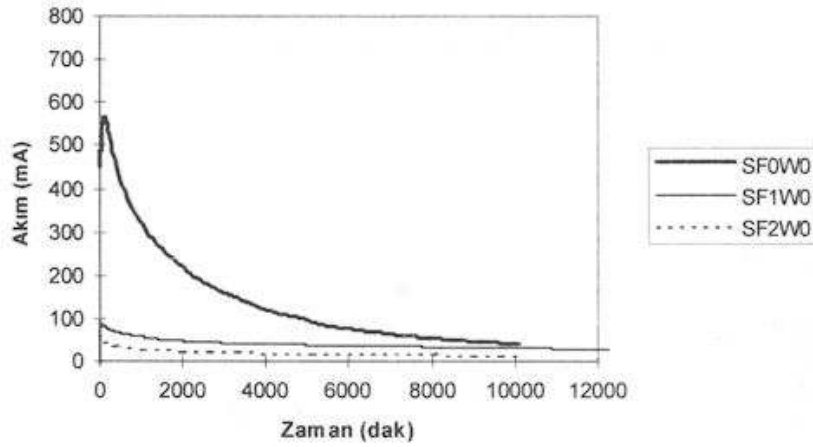
Şekil 8. Çözeltilerde bekletilen %10 silis dumana katkı grubun (%K-t) ilişkisi

Şekil 9 için **bakınız: 21**



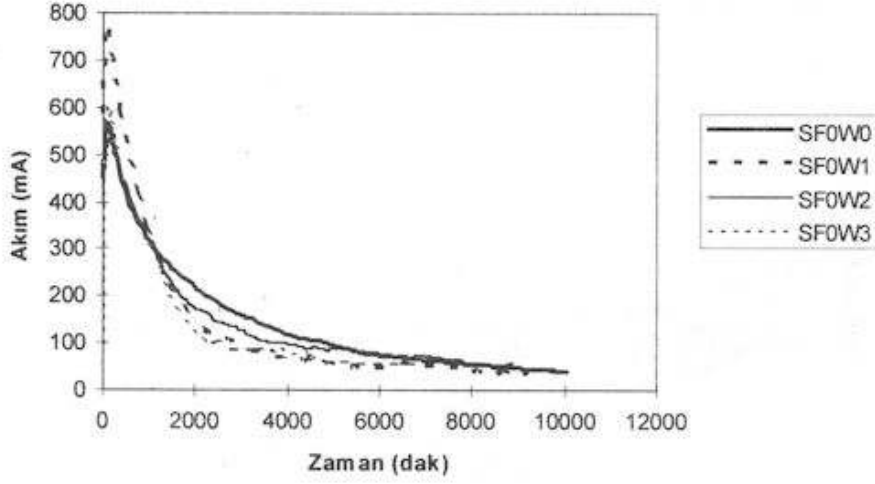
Şekil 9. Çözeltilerde bekletilen %20 silis dumana katkı grubun (%K-t) ilişkisi

Şekil 10 için **bakınız: 22**



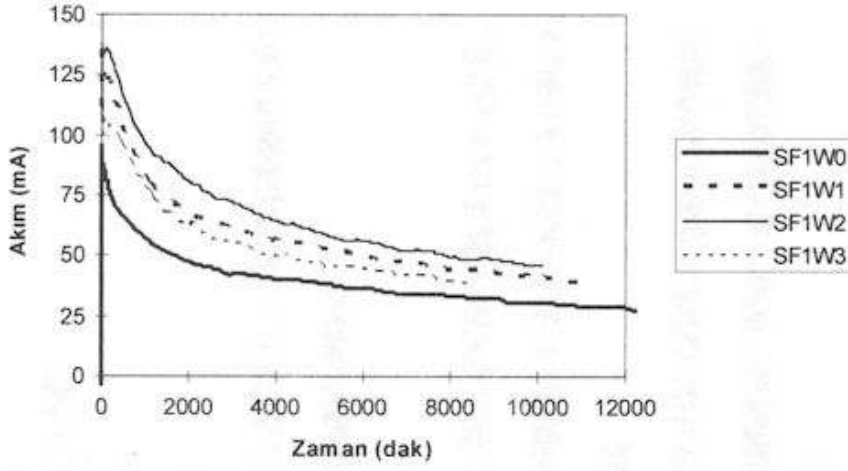
Şekil 10. Suda 208 gün bekletilen numunelerde akım şiddeti - zaman ilişkisi

Şekil 11 için [bakınız: 23](#)



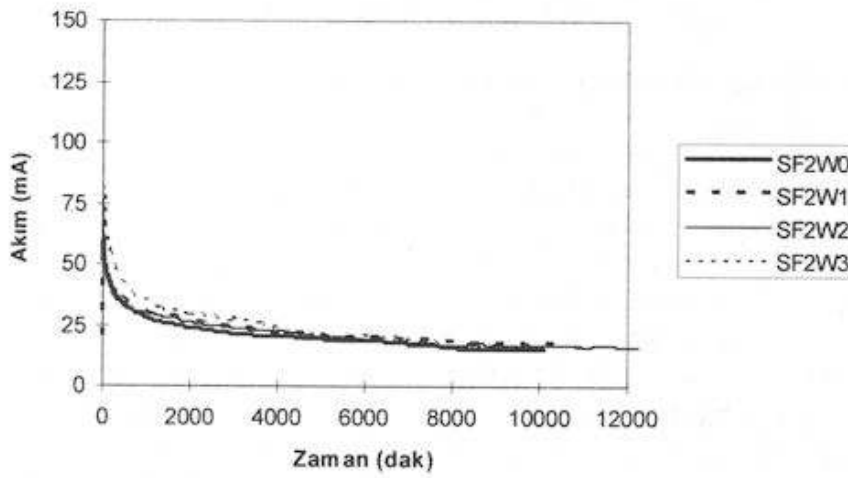
Şekil 11. Suda 208 gün bekletilen numunelerin akım şiddeti-zaman ilişkisine Cl<sup>-</sup> etkisi

Şekil 12 için [bakınız: 24](#)



Şekil 12. %10 silis dumanı katkı numunelerin akım şiddeti-zaman ilişkisine Cl<sup>-</sup> etkisi

Şekil 13 için [bakınız: 25](#)



Şekil 13. %20 silis dumanı katkı numunelerin akım şiddeti-zaman ilişkisine Cl<sup>-</sup> etkisi



Çizelge 2 için **bakınız: 26**

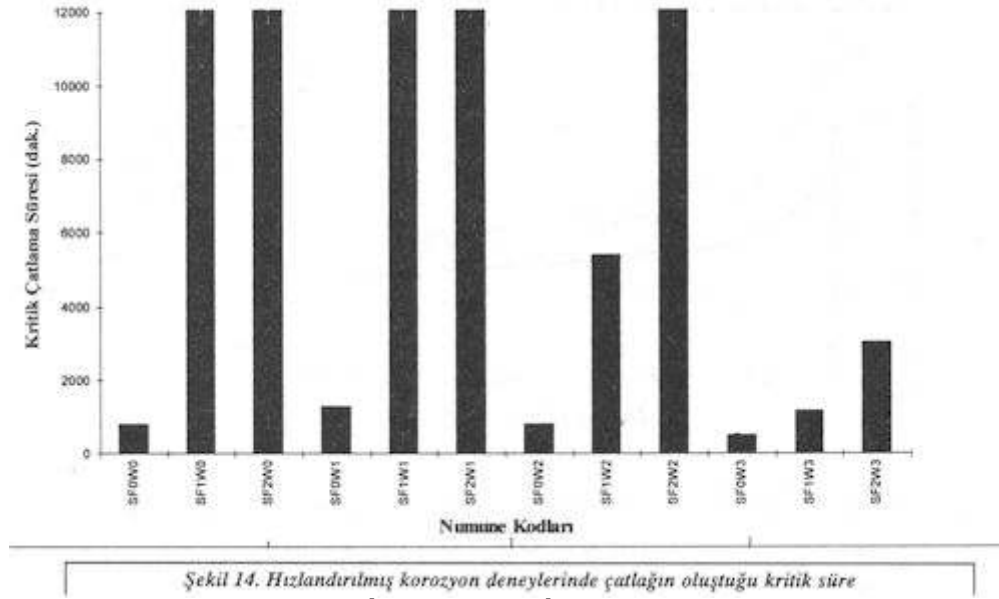
Çizelge 2. Hızlandırılmış korozyon deneylerinde çatlak oluştuğu kritik süre

Numune Kodları	SF0W0	SF1W0	SF2W0	SF0W1	SF1W1	SF2W1	SF0W2	SF1W2	SF2W2	SF0W3	SF1W3	SF2W3
Kritik Süre (dakika)	780	*	*	1260	**	*	780	5400	*	480	1140	3000

\* Çatlak oluşmadı

\*\* Çatlak var, ancak strain gauge'ye ulaşmamıştır.

Şekil 14 için **bakınız: 27**



Şekil 14. Hızlandırılmış korozyon deneylerinde çatlak oluştuğu kritik süre

#### 4. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

##### Kılcal Su Emme Deneyi

Suda bekletilen gruplardan şahit, %10 ve %20 silis dumanı katkılı numunelerin kılcal su emme katsayılarının bağlı değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Şahit ve silis dumanı katkılı harçların kılcal su emmesi, suda zamanla azalmaktadır, örneğin suda bekletilen şahit grubun (SF0W0) kılcal su emme katsayısı 28. günde  $3.22 \times 10^{-5}$  cmVs iken, 208. günde  $1.23 \times 10^{-5}$  cmVs ile %60 daha küçüktür. Harca katılan ve özgül yüzeyi çok yüksek olan silis dumanı, harcın kılcal su geçirimsizliğini azaltmaktadır. Kılcal su emme katsayısındaki düşüş, SF1W0 grubunda yaklaşık %10, SF2W0 grubunda %50'dir. Mineral katkıların, betonun dayanıklılığını artıran fonksiyonlarının en önemlisi beton boşluk yapısını iyileştirmesi ve dolayısı ile geçirimsizliği azaltmasıdır<sup>12</sup>!. Silis dumanı, çok ince taneli olması nedeni ile, çimento hamuru-agrega arayüzü ve çimento hamuru içindeki boşlukları doldurarak, kılcal boşlukların azalmasını sağlar.

Ortamda klorür iyonlarının bulunması durumunda, harç numunelerin kılcal su emme katsayılarındaki değişim Şekil 7-9'da gösterilmiştir. Silis dumanı katkısız numunelerin kılcal su emme katsayıları klorür etkisinin başlatıldığı günden itibaren, zaman içinde önemli değişiklik göstermemiş, ancak suda bekletilen grubunkinden bir miktar büyük değerler almıştır. Klorürün 180 günlük etki sürecinde, suda bekletilen numunelere göre, SF0W1 grubunda %28, SF0W2 grubunda %55, SF0W3 grubunda ise %40 daha büyüktür. Bu sonuçlar, tuz çözeltilisinin etkisinde  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin yıkanıp süzülmesi ve CSH'nin ayrışması sonucu, porozitenin arttığı görüşünü doğrular niteliktedir<sup>13</sup>

Farklı konsantrasyonlardaki klorür çözeltilerinin difüzyonuna maruz bırakılan %10 silis dumanı katkılı numunelerin, kılcal su emme katsayılarında önemli bir değişim olmamış, konsantrasyon etkisi görülmemiştir (Şekil 8). Harçlara %20 silis dumanı katılması durumunda, klorür etkisinin başlatıldığı 28. günde %50 daha düşük olan kılcal su emme katsayısı, 180 günlük klorür çözeltilisi etkisinde de şahit numunenin altında kalmıştır. Silis dumanı, mikroskobik boyuta sahip partiküllerinin yüksek özgül yüzey alanı ile betonun permeabilitesini azaltır. Bu partiküller, çimento hidratasyonu sırasında açığa çıkan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile reaksiyona girerek kapiler boşluklarda büyük miktardaki kalsiyum silikat hidrate fazını oluşturur. Daha az geçirimsizlik sağlayan silis dumanının bu özelliği, su ve klorür gibi betona nüfuz eden maddelerin azalmasına katkı sağlar<sup>14</sup>

## Hızlandırılmış Korozyon Deneyi

Hızlandırılmış korozyon deneyinde Şekil 10-13.'te görüldüğü gibi akım şiddetinde ilk dakikalarda hızlı bir artış kaydedilmiştir. Akım şiddeti, şahit numunede (SFOWO) 550 mA'ı aşarken, %10 silis dumanı katkılı betonda (SF1WO) 90 mA'e, %20 silis dumanı katkılı betonda (SF2W0) ancak 50 mA'e ulaşabilmiştir (Şekil 10). Silis dumanı katkılı betonlardan geçen akımın başlangıçta şahitinkinden daha az olması, silis dumanının donatı korozyonuna karşı betonun koruyuculuk özelliğini artırdığının bir göstergesidir.

28 gün suda, 1500,10000 ve 40000 mg/L klorür konsantrasyonundaki çözeltilerde 180 gün bekletilen grupların hızlandırılmış korozyon deneyinde ölçülen akım şiddeti-zaman değişimi Şekil 11-13.'te gösterilmiştir. Ortamda bulunan serbest Cl- iyonlarının elektriği daha kolay iletmesi, betonun iletkenliğinin artmasına ve akım şiddetinin daha büyük değer almasına neden olmuştur. Silis dumanının betonun geçirimsizliğini azaltması nedeni ile klorürlü çözeltilerin dışarıdan difüzyonunda, akım şiddeti şahite göre çok daha düşük değer almıştır, örneğin 40000 mg/L Cl- konsantrasyonundaki çözeltinin etkisindeki %10 silis dumanı katkılı numunelerde (SF1W3) akım şiddeti, SF1WO grubuna göre yaklaşık 20 mA gibi çok az bir artış ile 110 mA'e ulaşırken, %20 silis dumanı katkılı numunelerde Cl- etkisi yok denecek kadar az olmuş, bu grupta akım şiddeti en çok 75 mA'e ulaşmıştır. Silis dumanı içeren betonların elektriksel direncinin normal betonlardan daha yüksek değer aldığı; silis dumanının korozyon akım yoğunluğunu azaltarak korozyona karşı betonun koruyuculuk özelliğini artırdığı, bazı araştırmacılar tarafından da farklı deneyler ile gösterilmiştir(15,16,17)

## 3. SONUÇ

Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre:

- Betonun geçirimli olması, donatı korozyonuna neden olan en önemli faktörlerden biridir.
- Donatının korozyonunda alınacak ilk önlem, minimum boşluklu, akışkan geçirimsizliği düşük, dayanıklı bir beton üretmektir.
- Silis dumanı betonun geçirimsizliğini önemli ölçüde azaltmakta, elektriksel direncini artırmaktadır.
- Klorür geçirimsizliği son derece düşük ve elektriksel direnci çok yüksek olan silis dumanı katkılı betonlar, donatı korozyonunu önleyerek elemanın dayanıklılığına olumlu etki yapmaktadır. Su yalıtımı probleminde, silis dumanı gibi pu-zolan malzeme kullanımı, çözüm önerilerinden biri olacaktır.

## Teşekkür

"94-A-05-01-02 : Normal ve Silis Dumanı Katılmış Harçlara-Donatıya Klorür Etkisi" adlı Araştırma Projesini destekleyen Y.T.U. Araştırma Fonu Başkanlığına ve "INTAG 636 :Silis Dumanı ve Tarım Artığı Puzolan Katkılı Betonarme Elemanlara Sodyum Klorürlü Çözeltilerin Etkisi" adlı Araştırma Projesini destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

## KAYNAKLAR

- (1) Mehta, P.K., 1986, Concrete, Structure Properties and Materials, Printice-Hall, USA, pp. 152-158.
- (2) Çakır, A.E, 1994, Türkiye'nin Metalik Korozyon Kaybı, IV.Korozyon Sempozy um u, 25-27. 10. 1994, İstanbul Teknik Üniversitesi İstanbul, s. 1-8.
- (3) Rodriguez, P, Ramirez, E. and Gonzalez, J.A., 1994, Methods for Studying Corrosion in Reinforced Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.46, Nol67, pp.81-90.
- (4) Akman, M.S., 1992, Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi, İ.T.U. Matbaası, İstanbul.
- (5) Neville, A.M. and Brooks, J.J., 1987, Concrete Technology, Longman Scientific and Technical, New York, pp. 275-282.
- (6) Hansson, C.M., 1984, Comments on Electrochemical Measurements of the Rate of Corrosion of Steel in Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 14, No. 4, pp.574-584.
- (7) Nürnberger, U., 1984, Chloridekorrosion von Stahl in Beton", Betonwerk+Fertigteil-Technik, Vol. 9, pp. 601-612.
- (8) Uyan, M, 1975, Beton ve Harçlarda Kılcallık Olayı, Doktora Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi, Şubat, İstanbul.
- (9) Postacioğlu, B.,1986, Beton, Cilt 1, Teknik KitaplarYayınevi, İstanbul.
- (10) Neville, A.M., 1992, Properties of Concrefe, Third Edition, Longman Scientific and Technical New York, pp. 433-529.
- (11) Yüzer, N, 1998, Silis Dumanı Katkılı Betonarme Elemanlara Klorür Etkisinin Hızlandırılmış Korozyon Deneyi

tle Araştırılması, Doktora Tezi, YTU Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağustos, İstanbul.

(12) Uyan, M, Öz can, M. ve Yıldırım, H, 1998, Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Küllerinin Betonun Kılcallık ve Su Emme özelliklerine Etkisi, D.S.t. Beton-Çimento ve Boya Semineri, 24-26 Haziran, Ankara, s. 1-13.

(13) Feldman, R.F and Cheng-yi, H, 1985, Resistance of Mortars Containing Silica Füme to Attack by a Solution Containing Chlorides, Ce-ment and Concrete Research, Vol. 15 No. 3, pp. 411-420.

(14) Azari, M.M., Mangat, P.S. and Tu, S.C., 1993, Chloride Ingress in Microsilica Concrete, Cement and Concrete Composites, Vol. 15, pp. 215-221.

(15) Angi, L, Booyu, L, Guoping, H, Yeibo, C. and Guolion, S., 1991, Study on Corrosion Prevention in Reinforced Concrete Containing Condensed Silica Füme and its Application, II. CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal, Canada, pp. 499-509.

(16) Lorentz, T. and French, C, 1995, Corrosion on Reinforcing Steel in Concrete: Effect of Materials, Mix Composition and Cracking, ACI Materials Journal, Vol. 92, No. 2, pp. 181-190.

(17) Wiens, U, Breit, W. and Schiessl, E, 1995, Influence of High Silica Füme and High Fly Ash Contents on Alkalinity of Pore Solution and Protection of Steel against Corrosion, V. CANMET / ACI International Conference on Fly Ash, Silica füme, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Milwaukee, pp. 740-761.

\* Bu makale Yapıda Yalıtım Konferansı Bildiriler Kitabı'ndan alınmıştır. 11-12 Şubat 1999 İstanbul.